한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp. 774~779.

Petri Net을 이용한 CBR시스템의 사례검색

°오 용 민* · 임 동 수* · 황 원 우** · 정 석 권** · 양 보 석**

Case Retrieval of Case-Based Reasoning(CBR) System Using Petri Net

Y. M. Oh, D. S. Lim, W. W. Hwang, S. K. Jung and B. S. Yang

ABSTRACT

If rotating machinery have a fault, we can detect it using vibration or noise signals. However some maintenance engineers who doesn't have expert knowledge, needs the help of vibration experts for diagnosing rotating machinery. But qualified experts are rare, therefore we have been developed the case based reasoning (CBR) system which is able to manipulate the past experiences of vibration diagnosis experts. In the CBR system, the maintenance engineers can retrieve the information from previous cases which are most similar to new problem and they can solve new problem using solutions from the previous cases. In this paper, we propose a new method which is the case retrieval of CBR system using Petri net and we also applied it to diagnosis for electric motors as a practical problem.

1. 서 론

회전기계는 산업현장에서 다양한 작업을 수행하면서도 중요한 위치를 차지하고 있다. 회전기계의 특성상 진동 없이 운전될 수 없으며, 이러한 진동을 동정(identification)함으로써 진동 원인을 파악하고, 이 원인을 바탕으로 대책을 수립하여 수리를 할 것인지, 새로운 기계로 대체할 것인지 등을 결정하게 된다.

그러나 현재 발생하고 있는 현상을 바탕으로 원인을 발견하고, 그 대책을 수립하는 데에는 상당한 기간의 경험과 지식이 요구된다. 진동은 기계의 이상 혹은 결함을 진단할 때 중요한 인자로 고려되고 있지만, 진동을 이용한 기계의 이상 및 결함진단을 수행할 수 있는 진동진단 전문가는 절대적으로 부족한 것이 오늘의 현실이다.

이에 본 연구실에서는 전문가의 지식을 공유하기 위해 인공지능(AI : Artificial Intelligent)의 한 분야인 사례기반추론(Case-based Reasoning)[1,2]시스템을 이용한 진동진단을 위한 사례기반추론시스템을 개발[3,4]하였다. 진동진단 전문가가 현장에서 발생했던 다양한 현상을 관찰하여 진동 원인을 발견하고, 이에 따른 대책수립을 수행하였던 많은 양의 기술보고서를 표준사례(standard-case)의 형태로 정리하고, 사례기반추론이 가능한 형태의 라이브러리로 구축하였다. 그리고 유사사례검색을 위한 평가함수로써 수정된 여현일치함수(MCMF; modified cosine matching function)를 이용하였다. 그러나, 이 평가함수는 사례검색에만 이용될 뿐 새로운 사례에 대한 추가, 삭제 및 수정에는 아무런 도움을 주지 못하였다. 사례구축에 있어서 사례의 추가, 삭제 및 수정은 중요한 의미를 가지고 있기 때문에 이를 무시할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 Petri net을 이용하여 사례의 검색, 추가, 삭제 및 수정이 가능하도록 확장하였다. 그리고 기존의 검색도구를 이용한 검색결과와 Petri net을 이용한 검색결과를 비교하여 성능을 비교 · 검증하고 사례의 추가, 삭제 및 수정에 대한 기능도 추가하여 좀 더 사용자의 편의성을 도모하였다.

표준사례들을 각각 Petri net으로 모델링하고 가중치는 아크(arc)의 개수로 표현하며, 사용자의 입력 시 사용하는 가중치는 토큰(token)을 이용하였다.

* 부경대학교 대학원

** 부경대학교 기계공학부

2. 사례기반추론[1]

Riesbeck과 Schank에 의하면, **사례기반추론이란 과거의 어떤 문제를 해결하기 위해 사용했던 해결방법(경험)을 적용시킴으로서 새로운 문제를 해결하는 방법**이라고 정의할 수 있다.

Fig. 1은 사례기반추론의 기본적인 추론과정을 나타낸다. 먼저 새로운 문제(new case)가 발생했을 경우, 예전에 비슷한 상황을 기억(remember)하고 있는 유사사례를 검색(retrieve)하여 검색된 사례를 바탕으로 해결책(solution)을 얻는다. 만일 기존의 사례가 잘못되었다고 판단될 경우, 사례를 수정(revise)하여 새로운 사례로 추가(retain)하게 된다.

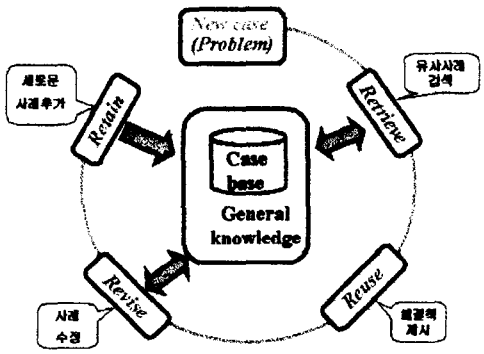


Fig. 1 Case-based reasoning cycle

3. 페트리 넷(Petri Net; PN)[5,6]

1962년 Carl Adam Petri가 제안한 페트리넷(Petri Net; PN)은 이산사건시스템을 표현하기 위한 시각적이고 수학적인 도구이다. 지금까지 PN은 정보통신, 제어분야 등에서 많은 연구[7,8]가 수행되어 왔으며, 본 연구에서는 CBR시스템의 사례검색에 PN을 이용하였다. 각 사례를 PN으로 모델링하고 상태방정식을 이용해서 토큰의 최종 발화개수를 파악함으로써 사례검색을 수행한다. 그래서 새로운 문제에 대한 해결책을 제공하고, 사례의 추가 및 삭제에 대한 기능도 PN으로 가능하도록 하였다.

3.1 PN의 정의

PN N은 다음의 7개의 요소로 구성되어 있다.

$$N = \{P, T, I, O, A, E, M_0\}$$

여기서

M_0 : 초기 마킹(marking)

$P = \{P_1, P_2, P_3, \cdots, P_m\}$: $m(>0)$개의 유한한 플레이스(place)의 집합

$T = \{T_1, T_2, T_3, \cdots, T_n\}$: $n(>0)$개의 유한한 트랜지션(transition)의 집합

$I = P \rightarrow T^{\infty}$: T로부터 P로의 아크를 나타내는 입력행렬(input matrix)

$O = T \rightarrow P^{\infty}$: P로부터 T로의 아크를 나타내는 출력행렬(output matrix)

$A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$: 가중치 1~ 5까지에 대한 아크(arc)의 집합

$E = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\}$: 가중치 1~ 5까지에 대한 토큰(token)의 집합

M(marking) : 각 플레이스에 있는 토큰의 개수

또한, $P \cap T = \emptyset$, $P \cup T = \emptyset$로 플레이스 집합 P는 사건의 상태나 조건에 대응하며 기호로는 "O"로 나타낸다. 트랜지션 집합 T는 사건의 진행이나 명령수행을 의미하고 기호로는 "□" 또는 " | (bar) "로써 나타낸다. 그리고 사건흐름의 방향성을 표시하는 Arc는 "→"로써 나타내며, 플레이스와 트랜지션을 결합한다. 시스템의 상태현황을 토큰으로써 " • "으로 나타내며, 플레이스 내부에 표시하여 상태의 활성(enable)을 정의한다(Fig. 2). 정보의 흐름을 나타내는 토큰은 시스템의 동적이고, 동시 발생적인 상황과 활동의 모의실험에 유용하게 사용된다.

본 논문에서는 각 사례에 대한 가중치 및 입력에 대한 가중치가 존재하므로 칼라(colored) PN[7]을 이용하였고, 그 정의를 Fig. 3에 나타내었다.

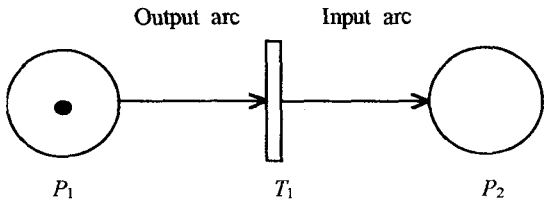
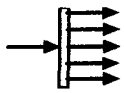
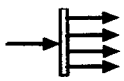
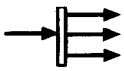
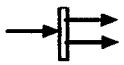
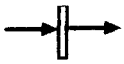
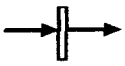
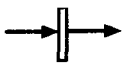


Fig. 2 Petri net

Table 1 Expression of weighting arc and token

Weight	Transition		Token
	Ordinary	Advanced	
5 (yellow)		(A_5)	○ (E_5)
4 (green)		(A_4)	● (E_4)
3 (red)		(A_3)	● (E_3)
2 (blue)		 (A_2)	● (E_2)
1 (black)		 (A_1)	● (E_1)

3.2 실행 규칙[5-8)]

3.2.1 활성화 규칙(enabling rule)

트랜지션의 모든 입력 플레이스에 토큰이 있을 때, 트랜지션은 활성화되고 발화(fire)할 수 있다.

3.2.2 발화 규칙(firing rule)

1) P_i로부터 T_j로의 아크 수만큼의 토큰이 P_i내에 존재할 때, T_j가 발화 가능하다.
2) 트랜지션의 발화는 순간적이므로, 다른 2개의 트랜지션이 동시에 발화할 가능성은 0이다.
3) 트랜지션 T_j의 발화에 따라 플레이스 P_i로부터 T_j로의 아크 수와 동일한 토큰이 이동된다.
4) 트랜지션 T_j의 발화에 따라 T_j로부터의 출력 아크 수에 동일한 토큰 수를 생성하고 T_j로부터 P_i로의 아크 수와 동일한 토큰을 할당한다.

3.3 상태 방정식(State Equation)[5,6)]

상태 방정식은 트랜지션의 발화에 의한 토큰 분포의 변화를 나타내는 식으로 식(1)과 같다.

$$\boldsymbol{M}(k+1) = \boldsymbol{M}(k) + \boldsymbol{B} \cdot T(k) \quad k = 0,1,2,\cdots \qquad (1)$$

여기서, $\boldsymbol{M}(k)$는 k 단계에 있어서 토큰의 개수, $\boldsymbol{B}$는 식(2)로 표현되는 Incidence matrix이다.

$$\boldsymbol{B}(P, T) = \boldsymbol{A}_i (P, T) - \boldsymbol{A}_o (P, T) \qquad (2)$$

여기서 $T(k)$는 k 단계에 있어서 트랜지션의 발화 순서이다. Incidence matrix $\boldsymbol{B}$는 PN의 플레이스의 수가 m이고, 트랜지션의 수가 n인 $m \times n$인 행렬로서, 토큰 분포에 대한 정보를 제공하는 역할을 한다.

4. 표준사례 및 라이브러리

본 연구에서는 전동기와 관련된 진단사례를 키워드로 추출한 후, PN으로 모델링하여 라이브러리를 구축하였다.

4.1 표준 사례(Standard Case)

전동기 관련 사례는 국내·외의 각종 기술자료[9)]를 바탕으로 재정리하였으며, Web browser를 통해 읽을 수 있는 HTML(Hyper Text Mark-up Language) 형태의 표준사례 형식으로 사례베이스를 구축하였다. 각각의 사례는 사례제목, 대상기계, 발생현상, 해석 및 자료분석, 실시한 대책, 교훈, 인용문헌의 형태로 정리되었으며 표준사례는 37건으로 전동기에서 발생되는 현상을 정리하였다. 기존의 라이브러리에 있는 데이터와는 달리 본 논문에서는 PN을 이용하여 각 표준사례를 모델링하였다.

이하에서는 예로 사례 1을 이용하여 설명한다. 사례 1에 대한 키워드는 Fig. 3과 같고, 각 키워드를 PN으로 모델링하면 Fig. 4와 같다. 그리고 각 플레이스를 Table 2와 같이 정의하면, Incidence matrix는 Fig. 5와 같이 구해진다. Fig. 3은 "키워드=가중치"으로 표현된다. 이러한 방법으로 각 사례에 대한 적용하면 PN으로 표현되는 라이브러리가 구축된다.

Motor-01 O4=1 R1=1 A1=1 F1=1 M0=1
E2=1 C0=3 S1=3 S2=3 S5=3 S8=3 Sd=3 Se=3

Fig. 3 Keyword for Case 1

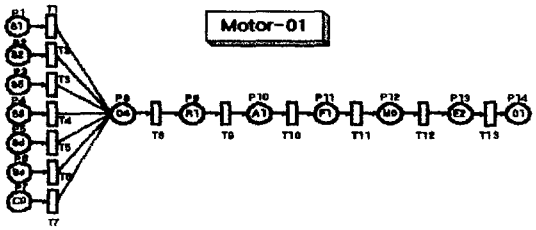


Fig. 4 The Petri net modeling

Table 2 The meaning of the each place

Division		Description	Place
Symptom	S1	베어링의 수직방향 진동	P1
	S2	베어링의 수평방향 진동	P2
	S5	전동기 기초에서의 진동	P3
	S8	유량에 따라 진동 증가	P4
	Sd	운전속도	P5
	Se	운전속도의 분수 및 배수조화성분	P6
Cause	C0	불평형	P7
Power	O4	1,000 HP이상	P8
RPM	R1	1,000~1,800 rpm	P9
Number of pole	A1	4 Pole	P10
Line frequency	F1	60 Hz	P11
Occurring machine	M0	펌프	P12
Occurring time	E2	전동기 기동 중	P13
No. of Case	Motor -01	전동기의 이물질 부착에 의한 불평형진동	P14

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
P1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
P8	3	3	3	3	3	3	3	-1	0	0	0	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0
P11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
P12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
P13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
P14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fig. 5 Incidence matrix ***B***

5. 결 과

5.1 사례검색(Case Retrieve)

PN 검색도구의 성능을 확인하기 위해, 임의의 입력값을 단독운전(M4), 회전자봉 이상(C5), 전원주파수 및 2배 성분 주위의 측대역파성분(Sg)으로 입력하였다.

먼저 해당 체크박스에 체크를 하고 가중치를 입력한다. 그러면 각 사례에 있는 해당 플레이스에 칼라 토큰이 부여되고 사례마다 발화를 시작한다. 최종 마킹이 되면 식 (3)에 의해 검색순위가 Fig. 8 및 9와 같이 가려진다.

$$RCV = \frac{FM_j}{\sum_{i=1}^{37} FM_i} \quad (j = 1,2,\cdots,37) \quad (3)$$

여기서, RCV(Retrieval Case Value)는 검색된 사례값, FM(Final Marking)은 최종 마킹된 토큰의 수이다.

Table 3, 4와 Fig. 6, 7의 결과를 볼 때, 기존의 검색결과와 거의 동일하게 검색되는 것을 알 수 있다. 이로써 PN을 이용해서 사례검색을 해도 문제점에 대한 해결책을 제시할 수 있다는 것을 알 수 있다. 다소 검색된 사례에 차이가 있는 것은 기존의 MCMF는 각 사례에 대한 키워드의 개수에 따라 값이 다르게 나타난다. 즉, 순종율이라 말할 수 있다. 같은 입력값이 있더라도 키워드가 작은 것이 높은 값을 가진다. 하지만, PN을 이용한 검색방법은 있는 그대로의 값을 계산해서 출력함으로써 다소 검색된 사례의 차이가 있다.

5.2 사례수정(Case Revise)

사용자가 좀 더 정확하고 유사한 사례를 검색하기 위해서는 기존의 사례들에 대한 추가 및 삭제를 할 필요가 있다. 본 논문에서는 사례추가창을 설정하여 기존의 사례에 대한 추가 및 삭제를 수행할 수 있는 기능을 추가하였다. 기존의 CBR에서는 Web기반이기 때문에 사례를 추가 또는 수정하기 위해서는 서버 또는 프로그램제작자만이 추가 또는 수정할 수 있다. 그러므로 일반 PC 즉, Web 기반이 아닌 Local PC에서는 불가능한 일이었다.

Table. 3 Weighting change at Cause

Weight	MCMF					PN				
	M-22	M-41	M-71	M-72	M-73	M-22	M-41	M-71	M-72	M-73
1	0	0.30619	0.36927	0.36927	0.30619	0.33708	0.67416	0.67416	0.67416	0.67416
2	0.34993	0.21651	0.26110	0.26110	0.21651	0.44776	0.67164	0.67164	0.67164	0.67164
3	0.38765	0.1599	0.19228	0.19228	0.1599	0.50279	0.67039	0.67039	0.67039	0.67039
4	0.40406	0.125	0.15076	0.15076	0.125	0.53571	0.66964	0.66964	0.66964	0.66964
5	0.41239	0.10206	0.12309	0.12309	0.10206	0.55762	0.66915	0.66915	0.66915	0.66915

Table. 4 Weighting change at Symptom

Weight	MCMF				PN			
	M-41	M-71	M-72	M-73	M-41	M-71	M-72	M-73
1	0.30619	0.36927	0.36927	0.30619	0.67416	0.67416	0.67416	0.67416
2	0.43301	0.52223	0.52223	0.43301	0.68702	0.68702	0.68702	0.68702
3	0.4797	0.57854	0.57854	0.4797	0.69364	0.69364	0.69364	0.69364
4	0.5	0.60302	0.60302	0.5	0.69767	0.69767	0.69767	0.69767
5	0.51031	0.61546	0.61546	0.51031	0.70039	0.70039	0.70039	0.70039

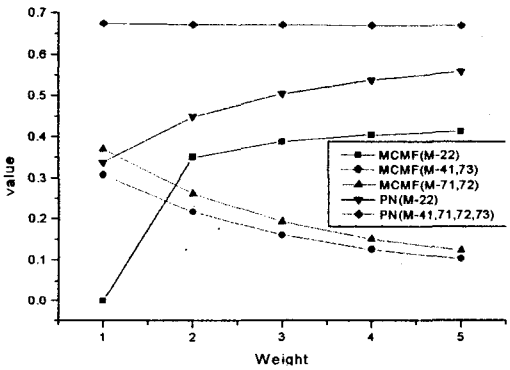


Fig. 6 Weighting change at Cause

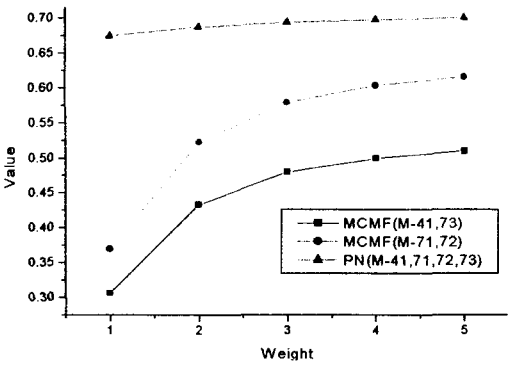


Fig. 7 Weighting change at Symptom

그러나 본 논문에서는 전문가의 허락만 있다면 사례데이터를 손쉽게 수정할 수 있다. 즉, 먼저 해당사례를 검색한 후 추가 및 삭제할 항목을 선택

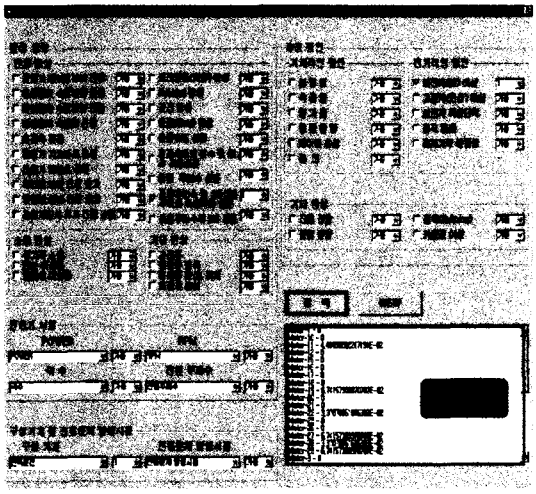


Fig. 8 The course of case retrieve

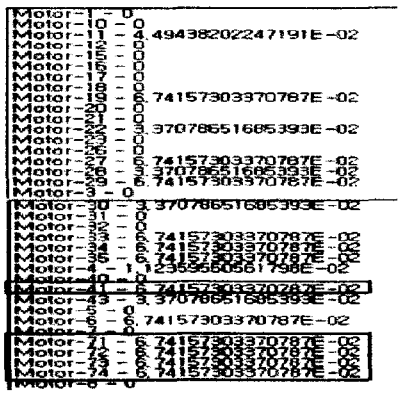


Fig. 9 The result of retrieve(cause)

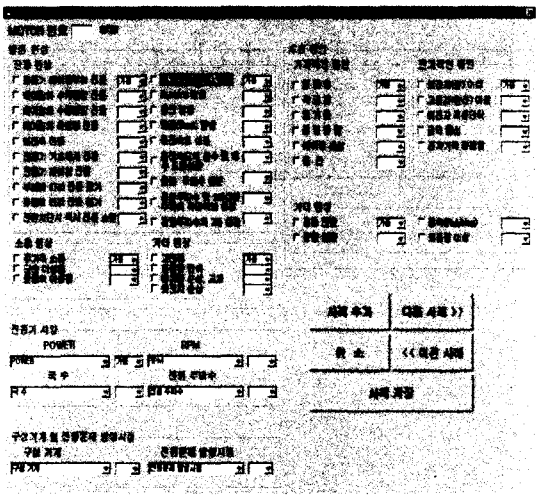


Fig. 10 The window of case revise

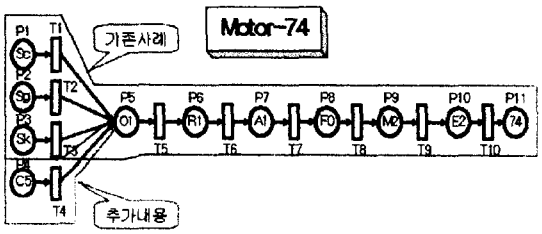


Fig. 11 The revise of case

하고 저장하면 새로운 PN 모델링(Fig. 11)이 다시 형성되고 Incidence matrix가 생성된다. 이렇게 되면 수정된 사례가 되고, 수정방법은 Fig. 10과 같다.

6. 결 론

사례기반추론시스템은 지식을 복잡한 규칙이나 특정한 형태로 일반화할 필요가 없다는 장점을 가지고 있다. 그리고 학습을 통해 성공 혹은 실패의 사례를 계속적으로 추가함으로써 사례를 증가시킬 수 있으며, 이로써 좀 더 전문가의 조언에 가까운 해결책을 제시할 수 있다. 본 연구에서는 기존의 MCMF를 이용한 CBR시스템에서의 문제점인 사례의 검색, 추가 및 삭제를 PN을 이용하여 가능하도록 개선하였다. 이로써 좀 더 전문가의 조언에 가까운 해결책을 제시할 수 있다. 또한, 실시간 진단(real-time diagnosis)이 가능하며, 검색과정 및 결과를 시각적으로도 표현이 가능하기 때문에 사용자는 손쉽게 결과를 확인할 수 있는 장점이 있다. 그리고 작성된 프로그램이 Visual Basic기반 프로그램이므로, 일반 PC뿐만 아니라 인터넷에서도 사용이 가능하다.

후 기

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1) A. Aamodt and E. Plaza, 1994, "Case-based Reasoning: Foundation Issues, Methodological Variation, and System Approaches"

2) R. Bergmann, et al., 1999, "Developing Industrial Case-based Reasoning Application : The INRECA Methodology"

3) 이창묵, 양보석, 2000, "회전기계의 이상진동진단을 위한 사례기반 추론시스템의 개발", 소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 1046-1050

4) B.S. Yang, D.S. Lim and C.M. Lee, 2000, "Development of a Case-Based Reasoning System for Abnormal Vibration Diagnosis of Rotating Machinery", Proceeding of International Symposium of Machine Monitoring and Diagnosis, JSME, Aug. 2-3, Nagoya Japan, pp.42-48.

5) J. L. Peterson, "Petri Net Theory and The Modeling of Systems" , Prentice-Hall, Inc., 1981

6) T. Murata, 1989, "Petri Nets : Properties, Analysis and Applications" , Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No.4, April.

7) Y. H. Nam, 1997, " Recognition of Hand Gesture for Virtual Environments Using Hidden Markov Model and Colored Petri Net", KAIST

8) C. S. Hwang, J. M. Lee, 1991, "An Algorithm for Determining Firing Sequence of Safe Petri Net Using its Matrix Equation" Trans. KIEE. Vol. 40. No.3

9) 양보석, 1998, "기계건강진단사례집", 효성출판사